

信号调制度测量的实现方案

李超翔¹ 崔 贺¹

LI Chaoxiang CUI He

摘 要

在当今复杂的信号处理技术领域，精确的信号调制度测量具有极为关键的意义。文章深入研究探索，精心设计并成功实现了一个专门用于信号调制度测量的系统，且针对信号调制度测量提出一种创新且高效的实施方案，旨在提高信号调制度测量的准确性，从而为相关信号处理领域提供更为精准可靠的调制度测量手段与技术支持。此方案由直接数字式频率合成器（DDS）、乘法器、混频器、中频放大器、检波器、分频器、CMOS 锁相环和若干模拟有源滤波器组成，这一系统可以通过一级自动增益和放大稳压，确保待测信号处于检波的线性区，并通过包络检波进行初步的信号分类。对于 AM 信号，系统进行采样、数据处理，并在屏幕上显示结果。对于非 AM 信号，系统采用混频技术，经过中频处理和解调，实现了 FM 和 CW 信号的自动识别。

关键词

调制解调；调制度；自动识别；信号处理；检波

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.12.012

0 引言

在无线通信领域中，信号调制度占据着举足轻重的地位，因其与信号传输的品质及效率之间存在着极为紧密且关键的联系，对整个无线通信过程的有效性及可靠性起着不可或缺的作用^[1]。因此，对信号的调制度进行准确测量，不仅可以为通信系统的设计与优化提供关键参考，也有助于维护与故障诊断。然而，由于多种不同的调制方式和在实际应用中存在的复杂信号环境，对信号调制度进行精确且快速的测量成为一个挑战^[2]。为此，本文提出了一套全新的信号调制度测量方案，旨在高效、准确地对各种信号进行调制度识别和测量。

该方案采用两步识别策略。首先，待测信号经过一级自动增益和放大稳压，确保其处于检波的线性区。其次，通过包络检波进行初步识别。识别为 AM 波时，将立即进行后续的采样、数据处理，并最终在屏幕上展示结果。识别为非 AM 波，待测信号则进入第二步识别，与 DDS 产生的本振信号进行混频、中频处理后，再进行解调、检波。经过这一系列操作，系统可以判别出是否为 FM 波，若是则进行相应处理，若不是，则为 CW 波。

本文详细描述了这套方案的具体实现步骤、所采用的技

术和理论依据，并通过实验证明了其测量准确度和工作效率。期望为未来的信号调制度测量研究和应用提供一种新的、有效的方法参考。

1 系统方案设计

1.1 系统整体方案设计

待测信号通过一级自动增益和放大稳压来保证待测波处于检波的线性区，后经过包络检波进行波形第一步识别，若识别出 AM 波则进行采样、数据处理、计算并送入输出，并在屏幕上显示。否则待测波形则为 FM 或 CW 波，未分辨的 FM 或 CW 波进入另一路通道与 DDS 产生的本振信号进行混频，混频后经由中频滤波、中频放大、比较器、CD4002 分频、CD4046 解调、峰值检波进行第二步识别，并在分频后送入单片机进行识别来自动确定本振信号，若能识别出调制波形则为 FM 波，进行采样、数据处理、计算后送入输出，并在屏幕上显示。否则为 CW 波送到屏幕显示。

1.2 AM 解调的方式

采用包络检波模块 ADL5511 进行包络检波。ADL5511 工作频段从直流到 6 GHz，可输出瞬时包络值和平均功率。该模块可用于 WCDMA、CDMA2000、LTE 及其他复杂的波形的检波。因 ADL5511 较小的漂移量^[3]，该方案抗干扰性相对较强，可检波范围广，检波失真度小。

1.3 FM 解调的方式

使用 CMOS 锁相环 CD4046 在几百 kHz 频段进行解

1. 杭州电子科技大学电子信息学院 浙江杭州 310018

[基金项目] 2023 年浙江省大学生科技创新活动计划（新苗人才计划）（2023R407009）

调。其通用的 CMOS 锁相环集成电路特点是电源电压范围宽 (3~18 V)，输入阻抗高 (约 100 MΩ)，动态功耗小，在中心频率 f_0 为 10 kHz 下功耗仅为 600 μW，属低功耗器件 [4]。

1.4 混频的方式

AD835 是一款高频的乘法器，常常用于调制解调 [5]。其芯片的良好性能，能相对较好的进行混频，且易于实现，功耗较低，混频较为干净，可用于高速乘法、除法、平方运算；宽带调制和解调；相位检测和测量；正弦波频率加倍；视频增益控制和键控；电压控制放大器和滤波器等领域。具有屏蔽外壳及防反接保护二极管。满量程上升至下降时间为 2.5 ns (采用 150 Ω 标准 RL)，0.1% 建立时间通常为 20 ns。低阻抗输出电压 w 能提供 ±2.5 V 电压，且输出驱动的负载最低为 25 Ω。使用该方案成本低、效率高、带宽高 [6]。

2 理论分析与计算

AM 波的表达式为：

$$u_{AM}(t) = (U_{cm} + k_a U_{\Omega m} \cos \Omega t) \cos \omega_c t \quad (1)$$

m_a 的计算公式为：

$$m_a = \frac{k_a U_{\Omega m}}{U_{cm}} \quad (2)$$

式中： m_a 为调幅系数或调幅度，它表明载波振幅受到调制的程度； k_a 比例常数，一般由电路决定； U_{cm} 和 U_{Ω} 分别为载波幅度和调制信号幅度。

FM 波的表达式为：

$$u_{FM}(t) = U_{cm} \cos \left(\omega_c t + k_f \frac{U_{\Omega m}}{\Omega} \sin \Omega t \right) \cos \omega_c t \quad (3)$$

m_f 的计算公式为：

$$m_f = k_f \frac{U_{\Omega m}}{\Omega} = \frac{\Delta f_m}{F} \quad (4)$$

式中： m_f 为调频指数，它表明调频波的最大相移； Δf_m 是调频波的最大频偏； F 是调制信号幅度。

3 硬件电路设计

3.1 整体电路设计

本系统整体框图如图 1 所示，固定输入信号，经过基带放大，放大到能够满足包络检波线性度较高、检波波形基本不失真的最小幅度。

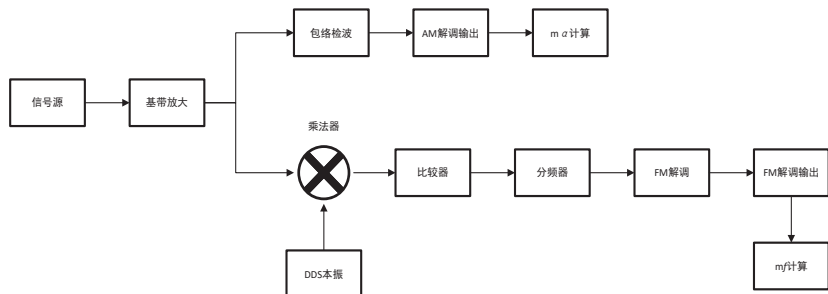


图 1 系统整体框图

3.2 乘法器电路设计

如图 2 所示，调制电路的乘法器使用了 AD835 芯片，电路简洁，使用差分对称输入保证输入信号相位差达到最小。同时提高了抗干扰效果 [7]。

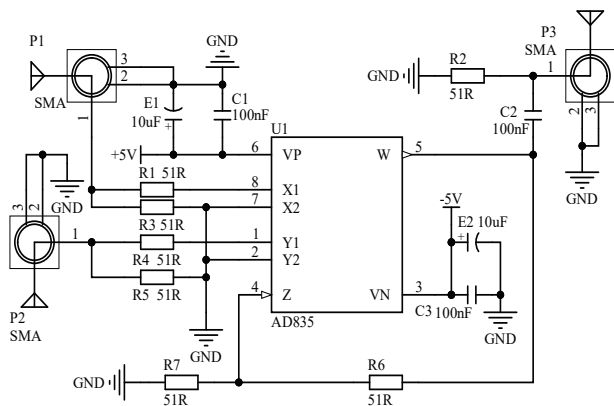


图 2 乘法器电路原理图

3.3 包络检波器设计

如图 3 所示，包络检波使用基于 ADL5511 芯片的 RMS 检波器，该芯片的带宽可以达到 6 GHz，单电源 5 V 供电，该电路可以直接检测出混频之前的 AM 信号，并将其解调，解调后通过 ±5 V 双电源供电的射极跟随器和隔直电路得到最终的解调信号。

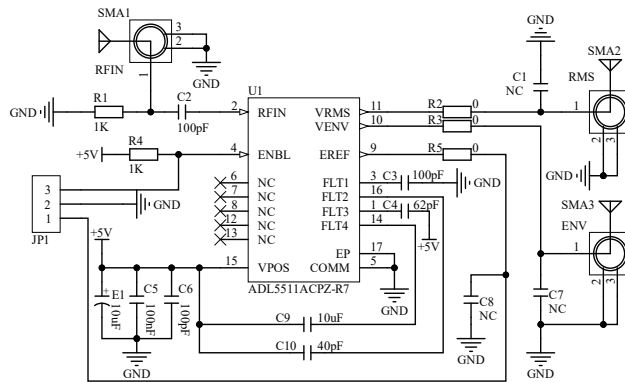


图 3 包络检波器电路原理图

3.4 解调电路设计

如图 4，CD4046 内置的两相比较器具有公共信号输入和公共比较器输入。对于大电压信号，信号输入可以直接耦合，对于小电压信号，信号输入可以电容耦合到自偏置放大器。线性压控振荡器 (VCO) 产生输出信号 (VCO Out)，其频率由 VCO_{IN} 输入端的电压和连接到引脚 C1A (6 脚)、C1B (7 脚)、R1 (11 脚) 和 R2 (12 脚) 的电容和电阻决定。 VCO_{IN} (解调器输出) 的源跟随器输出与 10 kΩ 或更

高的外部电阻一起使用。该方法线性度高，可解调的频偏范围大，效果良好。

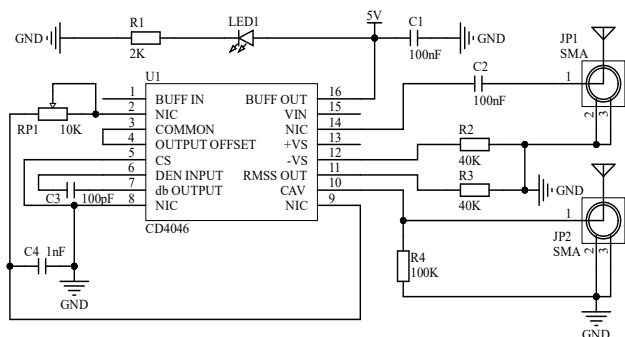


图4 解调电路原理图

3.5 滤波器设计

如图5所示，滤波器采用两个二阶有源巴特沃斯滤波器，可以通过调整电阻R1、R2、R5、R6和电容C1、C2、C3、C4的值来改变滤波器的截止频率；调整R7、R8、R9、R10的值来改变放大倍数。同时，受LM358运算放大器性能限制，采用了二极管及Ube倍增等电路来避免交越失真^[8]。

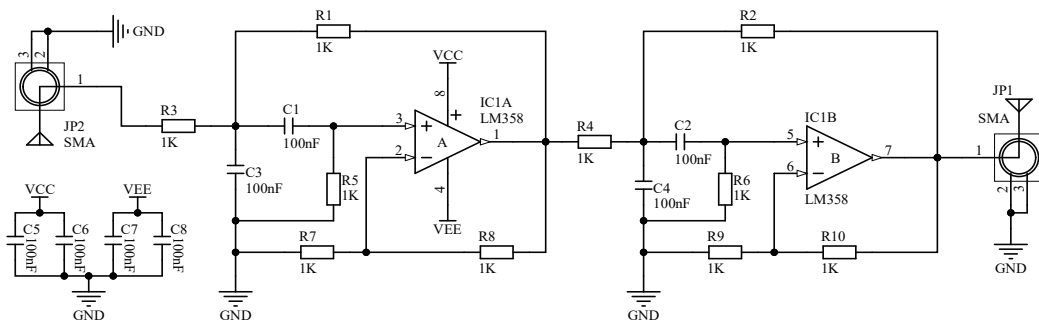


图5 滤波器电路

3.6 混频器设计

如图6所示，AD831的射频输入通过阻抗匹配网络连接，假设源阻抗为50Ω。

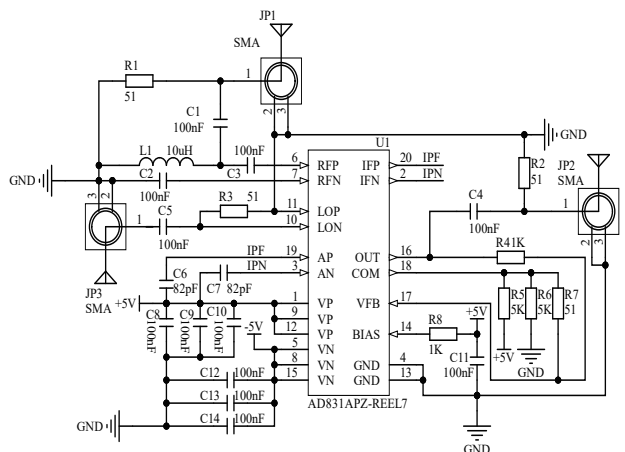


图6 接收混频电路

输入电路可以模拟成并联电容的电阻。从IFN和IFP连接到VP的82 pF电容（CF）在下变频应用中提供了一个截止频率约为140 MHz的低通滤波器。

LO输入是单端连接的，因为限制放大器为混频器提供对称驱动。为了最小化互调失真，用最短可能的路径连接引脚OUT和VFB。所示的连接用于单位增益操作。

在LO频率小于100 MHz时，AD831的LO功率可低至-20 dBm，以达到满意的工作效果。在100 MHz以上，必须使用指定的本端功率-10 dBm。

4 软件部分设计

4.1 AM调幅度的测量

通过将混频后的AM信号在中频段进行处理，ADC采集后找出波形的峰值和谷值，采用峰谷法计算AM信号的调幅度。通过采样记录和处理数据，利用最小二乘法拟合出符合这一特性的曲线，通过测量中频信号的波形的峰峰值和谷值，间接性地计算出AM的调幅度。

4.2 FM最大频偏的测量

借鉴AM调制度的测量方式，可明显发现FM的频偏与解调出信号的峰峰值存在的线性关系，得到当前的频偏，通过单片机的输入捕获可以测量出FM解调信号的频率，通过计

算可以得出FM的最大频偏。

4.3 自主识别信号调制类型与测量调制度

AM/FM/CW波形的自主识别程序流程图见图7。

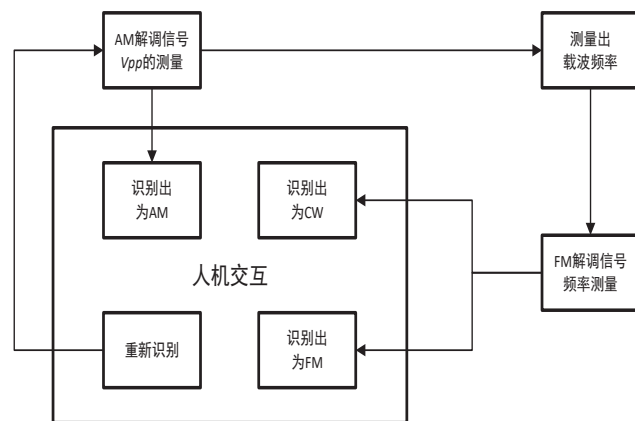


图7 自主测量识别部分软件流程图

5 测试方案及测试结果分析

5.1 测试仪器

数字示波器 DS2072A、信号发生器 DG4202、频谱分析仪 DSA815-TG、直流稳压电源 MPS-3005-L、数字万用表。

5.2 测试方法

利用示波器、信号源和频谱仪测试电路模块。使用学生电源和移动电源对系统进行供电。用万用表测试模块焊接情况等。改变信号发生器输出信号的类型和载波频率、调试信号频率、调制度、最大频偏等参数,监测显示解调信号波形并计算信号的调制度。

5.3 测试结果

输入载波频率为 10 MHz,载波峰峰值为 100 mV 的 AM 信号,输出端能解调出 1~3 kHz 的信号解调信号,且输出波形无明显失真。

取 20%、40%、60%、80%、100% 的调制深度进行测量,满足误差绝对值小于 0.1 的要求,最大相对误差为 0.05。

输入载波频率为 10 MHz,电压峰峰值为 100 mV 的 FM 信号,输出端能解调出 1~3 kHz 的信号解调信号,且输出波形无明显失真,频偏最高可取到 140 kHz 解调出波形不失真。

取频偏为 3 kHz、6 kHz、10 kHz、20 kHz 进行测量,测量误差均满足要求。

能够自主检测出三种波形,并显示出 m_a (Δf_m) 的测量结果,均在误差范围内。

5.4 结果分析

上述测试针对各项目逐项进行,完成了要求的各项指标功能,但仍有部分指标有待优化,如 m_a 精度、 f_m 精度等。由于电压对检波影响较大,器件随频率升高带来的非线性变化,以及线路中引入的杂波和谐波。虽然通过滤波等方式能够使信号更加干净,但有时仍然会有一些干扰。

6 结语

本文介绍了用于信号调制度测量的实现方案,该方案结合了硬件和软件设计,旨在高效、准确地对各种信号进行调制度识别和测量。设计的多功能系统,能够识别和测量 AM、FM 和 CW 信号的调制度,并采用两步识别策略以应对不同信号类型。

通过一系列的实验测试,验证了系统的性能和效果。测试结果表明,这一系统能够有效地识别和测量不同类型的信号,并且在各项性能指标方面表现良好。然而,一些指

标仍有待进一步优化,特别是在处理非线性和干扰^[9]方面。随着进一步的研究和改进,这一方案有望在无线通信领域发挥更大的作用,并为未来的信号调制度测量研究提供了有力的参考。

参考文献:

- [1] 林冲,闫文君,张立民,等.通信信号调制识别综述[J].中国电子科学研究院学报,2021,16(11):1074-1085.
- [2] 张铭宏.复杂环境下信号调制识别及抗干扰技术研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2023.
- [3] RAMIRO S,FRANK L.Design,characterization, and application of fast, broadband, high-dynamic range, three-axis field strength probes[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility,2013,55(6): 1007-1014.
- [4] 曾素琼.锁相环 CD4046 的应用设计及研究[J].电子质量,2012(1): 72-75.
- [5] 沈志昕,潘欣裕,汤豪杰,等.基于国产 FPGA 的 DSB 调制解调系统[J].物联网技术,2020,10(11):33-36.
- [6] 谭洋,刘建鑫,赵仕良.基于 AD835 的正弦波测幅[J].实验室研究与探索,2021,40(9):57-60.
- [7] 滕君华,梁丽芳,林彬,等.基于 CDIO 模式的通信电子线路实验教学设计[J].实验室研究与探索,2023,42(2):179-182.
- [8] 蒋俊华,侯卫周.互补输出级交越失真消除方法的仿真测试研究[J].实验技术与管理,2016,33(6):121-125
- [9] 苗豪伟.基于干扰消除的 MIMO-OTFS 系统信道估计与信号检测研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2022.

【作者简介】

李超翔(2002—),男,浙江温州人,本科,研究方向:新型材料。

崔贺(2002—),男,安徽宿州市人,本科,研究方向:嵌入式开发。

(收稿日期:2024-09-02)